УДК 621.373.826.004:662.3

О ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ЭРОЗИОННОГО ФАКЕЛА ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА МИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА БАЛЛИСТИТНЫЙ ПОРОХ

В.В. Медведев

Томский политехнический университет
E-mail: medvedev@tpu.ru

Экспериментально определена яркостная температура эрозионного факела на расстоянии 6 мм от торцевой поверхности баллиститного топлива. Воздействие осуществлялось лазерным излучением (длительность импульса 4,5 мс, длина волны 1,06 мкм, плотность энергии – до 60 Дж/см²) на нитроглицериновый непрозрачный образец типа пороха "Н". Эксперименты проведены на воздухе при температуре 20 °С. Наблюдались как низкочастотные, так и высокочастотные пульсации яркостной температуры во времени. Дана интерпретация экспериментально наблюдаемым явлениям.

Ранее [1] было показано, что при воздействии на баллиститный порох лазерного излучения (ЛИ) с плотностью мощности более 10^3 Вт/см^2 в приповерхностном пространстве образуется эрозионный факел, который может влиять на процесс зажигания. Необходимость более детального изучения эрозионного факела не вызывает сомнений. Одним из его параметров является яркостная температура. Информация о температуре в приповерхностном пространстве твердого топлива позволяет судить о тепловом балансе между газовой и конденсированной фазами, что необходимо для моделирования процесса зажигания порохов лазерным излучением. В предлагаемой работе предпринята попытка измерения яркостной температуры эрозионного факела в приповерхностном пространстве.

Эксперименты проводились на воздухе при нормальных условиях. Использовался импульсный неодимовый лазер, генерирующий квазипрямоугольный, квазинепрерывный (глубина модуляции не более 30 %) лазерный импульс (t_p=4,5 мс) с равномерным распределением интенсивности ЛИ по сечению пучка. Неравномерность засветки облучаемой поверхности составила не более 20 %. Реализовался многомодовый режим генерации. Более подробно импульсная лазерная установка и процедура измерения распределения интенсивности ЛИ по сечению пучка описаны в [2]. Вся открытая торцевая поверхность модельного нитроглицеринового топлива на основе пороха "Н", облучалась по нормали с плотностью энергии (E) ЛИ до 60 Дж/см^2. Использовались образцы с плотностью 1,34 г/см^3 в виде таблеток диаметром 8 и высотой 4 мм. На длине волны 1,06 мкм показатель поглощения пороха был равен ~360 см$^{-1}$, а коэффициент отражения ~8 %. Более подробная информация об исследуемом составе и методах измерения его оптических параметров изложены в [1].

Часть ЛИ ответвлялась светоделительной пластиной – 9 к задиафрагмированному окну калориметра – 4 РСИ-Э "Тантал", с помощью которого измерялась энергия лазерного импульса с погрешностью 6 %. Диаметр диафрагмы равнялся диаметру образца. Расстояния светоделительная пластина – 9 – окно калориметра – 4 и светоделительная пластина – 9 – образец – 15 были одинаковы. Энергия ЛИ регулировалась током накачки ламп лазера и нейтральными светофильтрами – 5. Часть ЛИ от светоделительной пластины – 6 поступала через нейтральный светофильтр – 7 к фотоприемнику – 8 ФЭК-09К, электрический сигнал направлялся на вход осциллографа С8-14, запуск которого осуществлялся с помощью блока управления лазера при нажатии кнопки "Пуск". На экране осциллографа фиксировалась форма и длительность лазерного импульса. Съемка процесса зажигания велась кинокамерой СКС-1М – 16 со скоростью 1000 кадров/с. Для точного измерения временного промежутка между кадрами использовалась электрическая схема питания лампы отметчика времени, которая позволяла регулировать по длительности и частоте временную метку и впечатывать ее на кинопленку.

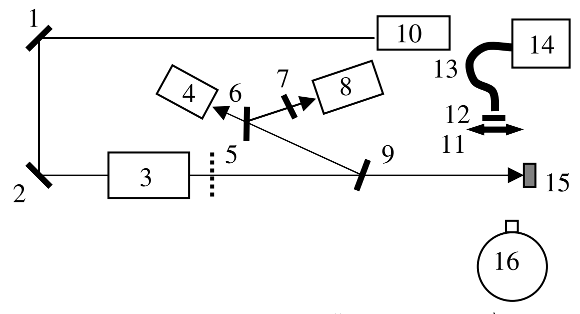


Рис. 1. *Схема экспериментальной установки: 1, 2) поворотные зеркала; 3) импульсный лазер; 4) калориметр; 5, 7) нейтральный светофильтр; 6, 9) светоделительная пластина; 8) фотоприемник ФЭК-09К; 10) юстировочный лазер ЛГ-56; 11) собирающая линза; 12) интерференционный светофильтр; 13) световодный жгут; 14) фотоэлектронный умножитель ФЭУ-22; 15) образец, 16) кинокамера СКС-1М*

В процессе экспериментов измерялась яркостная температура T_b объема диаметром ~ 1 мм эрозионного факела, находившегося на оси лазерного пучка на расстоянии 6 мм от торцевой поверхности образца – 15. С помощью собирающей линзы – 11 на торце световодного жгута – 13 с диаметром сердцевины 3 мм строилось увеличенное изображение >3 мм площадки диаметром 1 мм. Площадка помещалась на оси лазерного пучка на расстоянии 6 мм от торцевой поверхности мишени, а при проведении экспериментов – убиралась. Интерференционный фильтр – 12 с максимумом пропускания на

длине волны λ=0,613±0,01 мкм помещался перед световодом. Световой сигнал поступал к фотоприемнику – 14 ФЭУ-22, помещенному в светозащитный корпус, преобразовывался в электрический и направлялся на второй вход осциллографа С8–14, где фиксировался на экране. Линейность работы ФЭУ проверялась нейтральными светофильтрами с известными коэффициентами пропускания.

Для калибровки применялась лампа ТРШ 2850–3000 с телом накала из ленточного вольфрама (ширина ленты 1 мм), яркостная температура которой при постоянном напряжении U= 6,3 В и токе I=7,2 А составляла 2500 К. Центральная часть тела накала лампы совмещалась с местонахождением площадки. Световой сигнал Φ_0 от лампы регистрировался на осциллографе. Яркостная температура эрозионного факела определялась по формуле, выведенной из закона Вина: $1/T_b=1/T_0-\lambda\cdot\ln(\Phi_x/\Phi_0)/C_2$, где T_0 = 2500 K – яркостная температура лампы ТРШ 2850–3000, λ=0,613 мкм, C_2=1,438·10^{-2} м·К, Φ_0, Φ_x – световые сигналы от лампы и эрозионного факела. Переход от яркостных температур T_b к термодинамическим T для эрозионного факела представляется затруднительным [3]:

$$1/T=1/T_b+\lambda/C_2\cdot\ln(\varepsilon_{\lambda T}),$$

т.к. его спектральный коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda T}$ неизвестен. Если предположить, что свечение факела в основном дают углеродные частицы, то можно воспользоваться интерполяционной формулой [3]: $\varepsilon_{\lambda=0,66}=0,984-5,8\cdot10^{-5}\cdot T$, справедливой в интервале температур 1600...2500 К. Этой формулой можно воспользоваться и для λ=0,613 мкм, поскольку спектр излучения углеродных частиц в условиях нашего эксперимента мало отличается от спектра излучения серого тела, спектральный коэффициент излучения которого слабо изменяется с длиной волны.

Эксперименты показали, что T_b достигает своего максимума не сразу при воздействии ЛИ, а через некоторое время, исчисляемое в мс (рис. 2). При увеличении плотности энергии T_b достигает максимума за более короткое время. Изменение T_b во времени носило колебательный характер. Присутствовали как низкочастотные, так и высокочастотные пульсации T_b. В исследуемом интервале E максимальная T_b росла линейно с увеличением интенсивности ЛИ.

Смещение максимума T_b в область более коротких времен (рис. 2) при увеличении E связано с ростом скорости движения светящейся части эрозионного факела. Резкое уменьшение T_b после максимума (рис. 2, кривая 1), по-видимому, свидетельствует о том, что эрозионный факел экранирует ЛИ.

Низкочастотные колебания T_b при небольших интенсивностях ЛИ (рис. 2) связаны с процессом взаимодействия продуктов эрозии с кислородом воздуха. На кинограмме (рис. 3) хорошо видно, что при воздействии ЛИ и после него в приповерхностном пространстве мишени в газовой фазе развертываются события, которые приводят к низкочастотным пульсациям светового сигнала из исследуемой зоны.

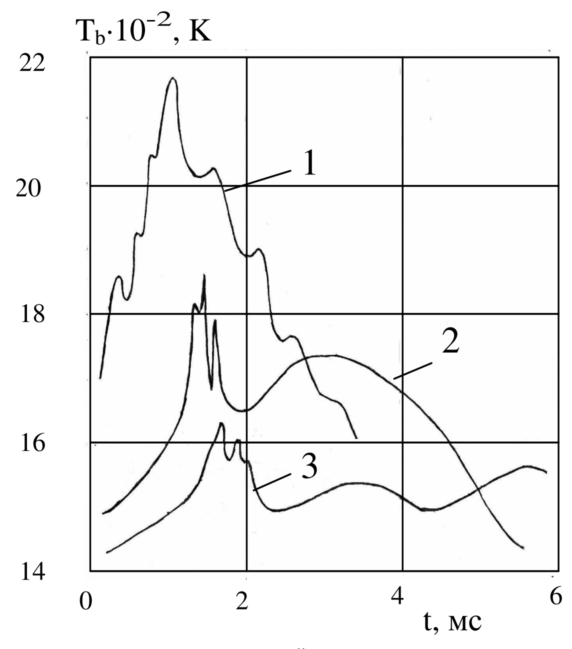


Рис. 2. *Изменение яркостной температуры эрозионного факела во времени при плотности энергии: 1) 34,2; 2) 19,8; 3) 10,3 Дж/см²*

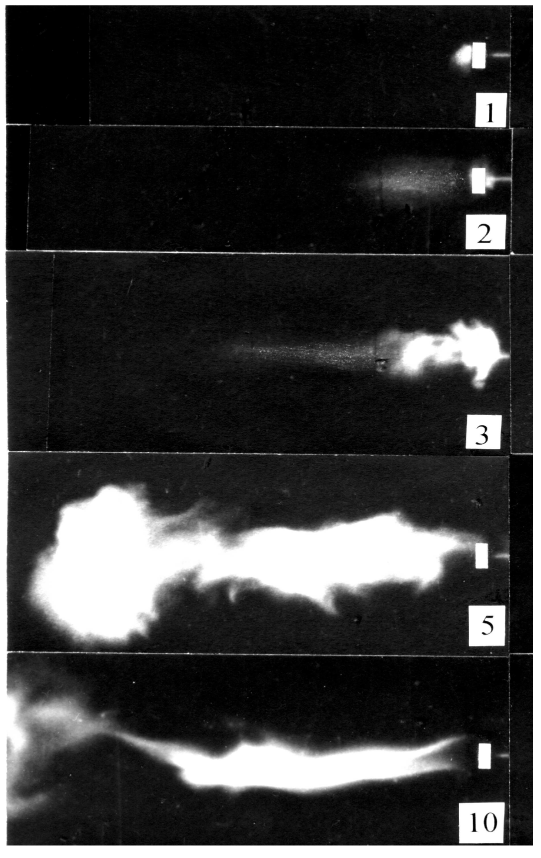


Рис. 3. *Кинограмма процесса развития эрозионного факела (E = 12,6 Дж/см²). Пояснения: 1) лазерный пучок направлен слева направо, 2) цифрами обозначено время в мс с момента воздействия ЛИ; т.к. темный образец на черном фоне не виден, на его место вставлена белая маска*

Высокочастотные пульсации T_b могут быть вызваны различными факторами. Во-первых, продукты эрозии являются химически активной средой. При воздействии на нее ЛИ в ходе химической реакции изменяются поляризация и показатель поглощения среды по отношению к данному излучению, что может приводить к сложной динамике термохимических процессов, неустойчивостям, автоколебаниям, т.д. [4]. Во-вторых, при воздействии ЛИ на химически активную газовую среду могут образовываться узкие локальные области повышенных температур, которые будут двигаться вдоль лазерного пучка [5]. В-третьих, эрозионный факел находится в движении, в результате чего образуются турбулентности. В работе [6] отмечается турбулизация газового потока при воздействии ЛИ на пироксилин (плотность мощности свыше 600 Вт/см^2). В нашем же случае плотность мощности превышает 10^3 Вт/см^2. В свою очередь, турбулентность эрозионного факела приводит к пульсациям T_b [7]. Чтобы выявить, какой из вышеперечисленных факторов (один или несколько) вызывают высокочастотные колебания T_b, необходимо провести дополнительные исследования.

Таким образом, в работе изучено поведение яркостной температуры эрозионного факела в объеме диаметром ~1 мм, находившемся на оси лазерного пучка на расстоянии 6 мм от торцевой поверхности баллиститного пороха. Показано, что изменение T_b во времени имеет пульсирующий характер. Представляет интерес дальнейшее изучение эрозионного факела. Например, выявить механизм пульсаций T_b, измерить T_b на разных расстояниях от поверхности, изучить экранирующие свойства, динамику разлета эрозионного факела, его структуру и так далее. Изучение влияния эрозионного факела на все стадии зажигания позволило бы создать адекватную модель лазерного зажигания порохов. Кроме того, имеется и прикладной аспект проблемы. Например, экранирующие свойства эрозионного факела могли бы пригодиться для защиты объектов от воздействия лазерного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев В.В. Влияние интенсивности лазерного излучения на пороги зажигания пористого двухосновного топлива // Химическая физика. – 2004. – Т. 23. – № 3. – С. 73–78.
2. Медведев В.В. Лазер с регулируемой длительностью импульса на базе серийного о.к.г. ГОС-301 // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 6. – С. 89–91.
3. Рибо Г. Оптическая пирометрия. – М.-Л.: ГТТИ, 1934. – 455 с.
4. Бункин Ф.В., Кириченко Н.А., Лукьянов Б.С. Термохимическая бистабильность и химические фазовые переходы, стимулированные лазерным излучением // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11. – № 6. – С. 1183–1198.
5. Калиниченко М.И., Трофимов В.А. Об особенностях макрокинетики газофазных реакций, вызванных тепловым воздействием оптического излучения. Численный эксперимент // Известия АН СССР. Сер. физическая. – 1991. – Т. 55. – № 6. – С. 1211–1215.
6. Абруков В.С., Аверсон А.Э., Алексеев М.В. и др. Исследование процесса зажигания к-систем методом поляризационной интерферометрии // В сб.: Физика горения и методы ее исследования. Под ред. С.А. Абрукова и др. – Чебоксары, 1980. – С. 10–17.
7. Кадышевич А.Е. Возможности и пути развития оптической пирометрии пламен // В сб.: Измерение температур пламен и газовых потоков. Труды комиссии по пирометрии при ВНИИМ. – М.: Стандартгиз, 1958. – Сб. 1. – С. 5–21.